

潮褐土土壤养分的空间分布特征

朱安宁¹, 张佳宝¹, 张玉铭², 信秀丽¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2 中国科学院石家庄农业现代化研究所, 河北 石家庄 050021)

摘要: 应用主成分分析方法和地统计学方法, 对河北省栾城县—15hm² 试区里潮褐土全氮、全磷、有机质、速效磷、速效钾、碱解氮、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 等土壤养分含量的空间变异规律进行了定量分析。为实现土壤养分的精准管理和变量平衡施肥提供了科学依据。

关键词: 土壤养分; 空间变异; 主成分分析; 地统计分析

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2004)02-0097-05

由于传统的均匀施肥方法带来很多经济问题和很大的生态压力, 近年来, 精准农业特别是养分的精准管理在一些发达国家和地区正成为研究热点^[1-4]。精准农业是一种战略思想, 是信息与人工智能高新技术在农业中的宏观运用, 它的全部概念是建立在“空间变异”的数据采集和处理基础上。如何用有限容量的样本推断空间和时间上任一点的农田基本信息的性质, 是精准农业能否实现的关键。

由于天然土壤的随机性和农民田间管理的千差万别, 这导致农田土壤养分存在着很大的空间上的分异, 而且, 许多土壤养分在空间上并不是独立的, 而是存在着空间上的相关性, 这种相关性可在不同的尺度上反映出来。80 年代初, Burgess 和 Webster 等首先将以地统计学为基础的区域化变量理论引入土壤性质的空间变异性研究中^[5], 克服了传统的 Fisher 统计理论的明显不足。主成分分析法在土壤性质的研究中应用较少, Okuda 曾应用主成分分析法分析了土壤性质的变异与火山口距离的关系^[6], Cheng 通过主成分分析土壤性质的光谱反射系数来预测土壤性质^[7], 都取得了较好的效果。

本文应用主成分分析方法和地统计学方法, 对冀中平原潮褐土土壤养分的空间分布特征进行了定量分析。

1 材料和方法

1.1 试验区域

试区位于河北省栾城县中国科学院栾城农业生态实验站, 面积约 15hm², 常年玉米和小麦轮作, 耕层土壤主要为轻质潮褐土。

在冬小麦播种前, 利用 20m × 20m 网格采集土壤样本, GPS 定位, 在 0~15cm 土层深度取混合样 220 个(图 1, 坐标为经纬度)。测定项目包括全氮、全磷、有机质、速效磷、速效钾、碱解氮、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N。

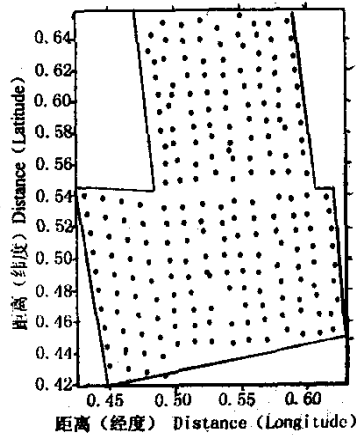


图 1 试验区域取样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the experimental field

1.2 化学分析方法

土壤中全氮用半微量开氏法测定; 全磷用氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定; 有机质用重铬酸钾氧化-外加加热法测定; 速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度法测定; 碱解氮用碱解扩散法测定; NH₄⁺-N 用氯化钾浸提-蒸馏法测定; NO₃⁻-N: 镀铜镉还原-重氮化偶合比色法测定。

收稿日期: 2002-11-12

基金项目: 中国科学院创新方向项目(KZCX2-404); 国家高技术研究发展计划(863)课题(2003AA209010); 国家高技术研究发展计划(863)课题(2001AA245013); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999011803)资助。

作者简介: 朱安宁(1969-), 男, 安徽潜山人, 助研, 在读博士, 主要从事土壤物理与精准农业研究。

1.3 主成分分析法

在科学研究中,多变量大样本无疑会提供丰富的信息,但也在一定程度上增加了数据采集的工作量,更重要的是在大多数情况下,许多变量之间可能存在相关性而增加了问题分析的复杂性。主成分分析就是用较少的综合指标(即因子或主成分)分别综合存在于各变量中的各类信息,使其成为变量减少并相互独立的新变量,以此表示新的样品关系。

假设原始变量矩阵为 X , 通过计算其相关系数矩阵及该矩阵的特征值和特征向量, 得到主成分(components)分数矩阵 Z , 它们的关系可用矩阵形式表示为:

$$Z = AX \quad (1)$$

式中, A 为主成分变换矩阵。

主成分的特征值表示主成分对原样品的影响程度, 特征值愈大表示对原样品性质的解释能力愈高, 特征值愈小表示对原样品性质的解释能力愈低。因此, 保留特征值较大的主成分, 淘汰特征值小且影响小的主成分, 如保留 K 个重要的主成分, 则成分分数可用下式表示:

$$Z_K = A_K X \quad (2)$$

式中, Z_K 为选取 K 个主成分后的主成分分数矩阵, A_K 为选取 K 个主成分后的转换矩阵, 即选取的 K 个特征向量矩阵, X 为原始变量矩阵。因此, 就可以用 K 个主成分表示原始变量的特性, 而包含的原变量的各类信息则相对损失较少。

1.4 克立格(Kriging)法

研究土壤性质的空间变异时, 观察点和取样点总是有限的, 因而对未测点的估计是完全必要的。地统计学中常用的估值方法是克立格法。克立格插值首先要确定土壤某一性质的半方差函数, 在内蕴假设的前提下, 半方差函数可表示如下:

$$r(h) = 1/2 \text{var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (3)$$

式中, $r(h)$ 表示半方差函数, $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在相距 h 的两点 x 、 $x+h$ 处的值, var 表示方差。

确定了半方差函数就可以确定土壤某一性质的空间分布特征, 再根据其空间分布特征进行克立格插值。克立格法在土壤科学中的应用大多为点状克立格法^[8]:

设在一区域内, $\hat{Z}(x_0)$ 为某一变量在位置 x_0 处的估值, 其周围相关范围内的已测定值为 $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, 3 \cdots n$), 则 x_0 处的估值可用 $Z(x_i)$ 的线性组合来估测:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

式中 λ_i 是与 $Z(x_i)$ 位置有关的权重系数。再通过达到线性无偏和最小估计方差得到该变量在 x_0 处的最优估计值。

2 结果与讨论

2.1 主成分分析

主成分分析得到的综合指标往往是不能直接观测到的, 但它更能反映事物的本质。图 2 是以主成分分析计算上述 8 个土壤养分得到的各成分特征值图。

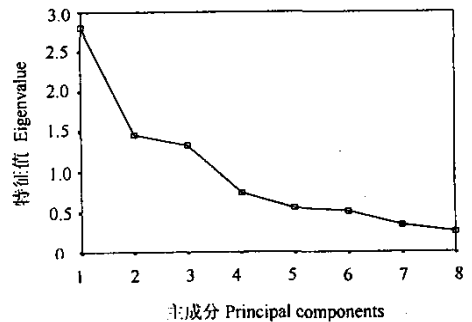


图 2 主成分特征值

Fig. 2 The eigenvalues of principal components

图 2 中, 最初的 4 个主成分的特征值较大, 我们选取最初的 4 个主成分作为解释 8 个土壤养分空间变异的新变量, 它们代表原样品解释变异范围的效力分别为 35.1%、18.3%、16.6% 和 9.3%, 累积达到 79.3% (表 2), 即仅用 4 个主成分就可以综合原 8 个土壤养分所代表的近 80% 的信息, 土壤养分信息损失较少, 并且大大简化了问题分析的复杂性。

主成分分析中, 通过 4 次最大正交旋转, 可以使原土壤养分与提取的 4 个主成分之间的相关系数向 0~1 两极分化, 使每个主成分中需要解释的原土壤养分达到最少。比较旋转后的各个主成分与原土壤养分的相关系数(图 3, 图中 OM、TN、HN、TP、AP 和 AK 分别表示有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷和速效钾, C1、C2、C3 和 C4 依次表示 4 个主成分, 下同), 第一个主成分与有机质、全氮和碱解氮密切相关, 与其它 5 种性质基本不相关。土壤中全氮含量相对比较稳定, 它的含量与分布和土壤有机质密切相关。第二个主成分显示主要受全磷和速效磷的影响较大。土壤中磷素的变化比较快, 不仅在空间范围上有显著变化, 在时间上

也有明显变化。第三个主成分主要受速效氮影响,包括硝态氮和铵态氮。在集约栽培条件下(该地区为一年二熟制),土壤起始速效氮含量一般较低。第四个主成分仅与速效钾显著相关,该地区钾素含量主要受黄土母质的影响。

表 1 主成分分析总方差分解表

Table 1 Total variance explained of principal component

成分 Component	特征值 Eigenvalue	PV (%)	CPV (%)
1	2.808	35.098	35.098
2	1.463	18.284	53.382
3	1.329	16.617	70.000
4	0.743	9.287	79.287
5	0.549	6.864	86.151
6	0.517	6.457	92.608
7	0.343	4.292	96.900
8	0.248	3.100	100.000

注:PV、CPV 分别为各成分所解释的方差占总方差的百分比和各成分所解释的方差占总方差百分比的累积值。

Note: PV and CPV mean percent and cumulative percent of total variance explained respectively.

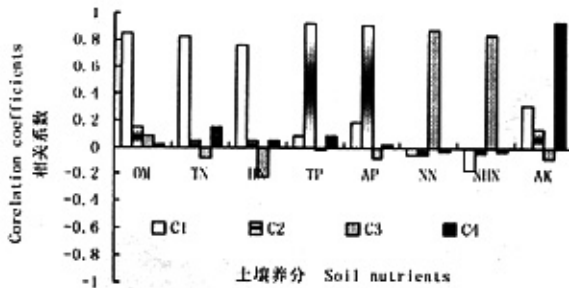


图 3 土壤养分对应主成分的相关系数

Fig. 3 The correlation coefficient of principle components of soil nutrients

表 2 土壤养分描述统计结果

Table 2 Descriptive statistics of soil nutrients

n = 220

项目 Item	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数 CV%	峰值 Kurtosis	偏斜度 Skewness
全氮 (%)	0.082	0.119	0.101	0.007	0.070	0.064	0.125
全磷 (%)	0.057	0.153	0.074	0.008	0.107	45.403	4.937
有机质 (%)	1.121	2.280	1.659	0.169	0.102	1.350	0.778
速效磷 (mg kg ⁻¹)	3.798	98.240	8.411	6.766	0.804	143.006	10.892
速效钾 (mg kg ⁻¹)	87.000	193.000	114.791	17.172	0.150	2.348	1.273
碱解氮 (mg kg ⁻¹)	42.875	106.050	71.931	9.327	0.130	1.125	0.388
NH ₄ ⁺ - N (mg kg ⁻¹)	0.000	14.576	1.741	1.957	1.124	8.236	2.026
NO ₃ ⁻ - N (mg kg ⁻¹)	0.46	122.601	17.471	21.627	1.238	7.278	2.497

根据主成分得分系数和原土壤养分的标准化值可以计算每个观测量的各成分的得分,据此可以对观测量进行进一步的地统计分析。4 个主成分得分可以分别表示如下:

$$C1 = 0.416(TN) - 0.082(TP) + 0.472(OM) - 0.017(AP) - 0.082(AK) + 0.39(HN) + 0.006(NH_4^+ - N) + 0.081(NO_3^- - N) \quad (5)$$

$$C2 = -0.082(TN) + 0.562(TP) - 0.009(OM) + 0.543(AP) - 0.046(AK) - 0.07(HN) + 0.028(NH_4^+ - N) + 0.006(NO_3^- - N) \quad (6)$$

$$C3 = 0.04(TN) + 0.032(TP) + 0.154(OM) - 0.004(AP) + 0.029(AK) - 0.065(HN) + 0.55(NH_4^+ - N) + 0.589(NO_3^- - N) \quad (7)$$

$$C4 = -0.032(TN) - 0.007(TP) - 0.193(OM) - 0.109(AP) + 1.09(AK) - 0.147(HN) + 0.048(NH_4^+ - N) + 0.027(NO_3^- - N) \quad (8)$$

2.2 地统计分析

潮褐土养分空间分布的等值线图显示(图 4),各养分的分布都存在一定的空间变异,其中速效磷、NH₄⁺ - N 和 NO₃⁻ - N 的变异较大,全氮、全磷、有机质、速效钾和碱解氮的变异较小(表 2)。

NH₄⁺ - N 和 NO₃⁻ - N 的变异系数很大,它们在空间的平均偏差分别达到 112.4% 和 123.8%,在试区的南部含量较高,北部很低。从图上看,速效磷在大部分试区的变异很小,由于受东北部少数高样本值的影响,其变异系数偏高。全磷、有机质、速效钾和碱解氮的变异基本小于 15%。全氮的空间变异最小,空间的平均偏差仅为 7%,因为土壤中全氮是比较稳定的,农业管理对它的影响相对较小。表 2 表明,全氮的峰值系数最小,为 0.064,速效磷最大,为 143.006,在概率密度直方图上表现为全氮分布最陡峭,速效磷分布最扁平,即全氮含量大多在均值水平,而速效磷含量水平变异较大。

从空间分布等直线图看,主成分分析与地统计分

析基本相吻合。第一个主成分(C1)得分在试区西南

部出现一个较高值区,与有机质、全氮和碱解氮的分布基本一致。第二个主成分(C2)分布显示,整个试区的

得分偏低,即磷素水平较低,尤其从试区北部到南部有一个狭长的低值带,相应的主成分得分为负值,这与前

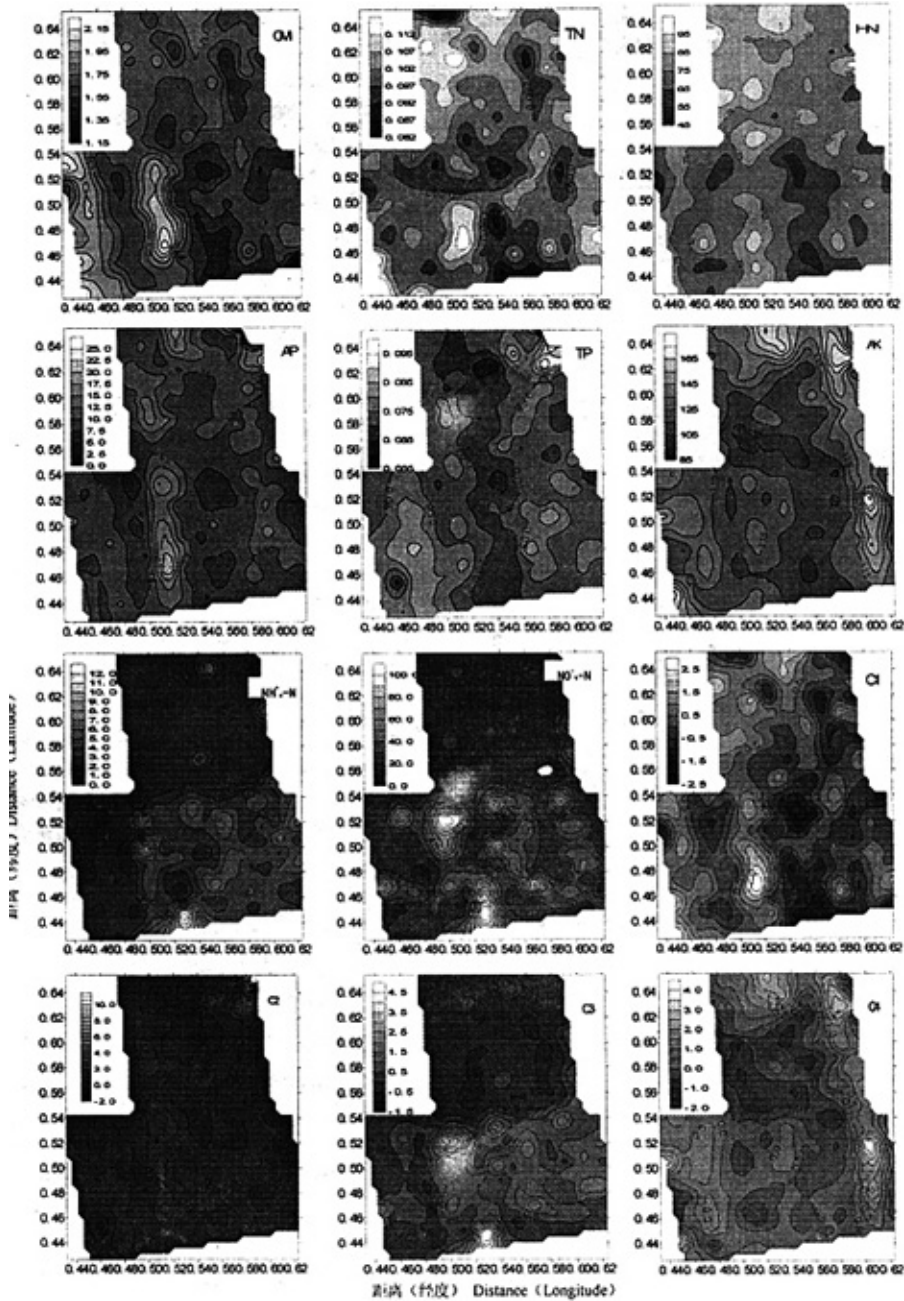


图 4 土壤养分和主成分空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of soil nutrients and principal components

季作物为玉米有关。第三个主成分(C3)分布与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的空间分布非常相似,速效氮整体水平低,其在试区北部得分都小于 -0.5。第四个主成分分布很好地反映了速效钾的分布,试区钾素含量水平较好,中南部稍低,东部、西部和北部较高。

3 结 论

通过对河北栾城地区潮褐土土壤养分的空间变异分析结果表明,不同的土壤养分空间变异的程度是不同的,反映了不同土壤特性空间结构、自身性质以及农田管理方法的差异。在分析项目较多的情况下,主成分分析能大大简化问题分析的复杂性,较有效率地解释研究区域土壤养分的空间分布。用地统计方法描绘土壤养分的空间分布图,定量地分析了土壤养分含量水平的差异,不同的养分含量水平有了合理的分界线,为农田土壤养分的精准管理提供了科学依据。

参考文献:

[1] Cahn M D, et al. Spatial analysis of soil fertility for site specific crop

- management[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1994, 58:1240 - 1248.
- [2] Fixen P E. Research needs for site - specific nutrient management to benefit agriculture[J]. Better Crops with Plant Food , 1998, 82 (1): 20 - 23.
- [3] Gupta R K, Mostaghimi S, McClellan P W, Alley M M and Brann D E. Spatial variability and sampling strategies for $\text{NO}_3^- - \text{N}$, P, and K determinations for site - specific farming[J]. Trans. ASAE , 1997, 40:337 - 343.
- [4] Reetz H F Jr. Site - specific nutrient management system for the 1990s[J]. Better Crops with Plant Food , 1994, 78(4):14 - 19.
- [5] Bergess T M and Webster R. Optimal interpolation isar.tomic mapping of soil properties I. The semi - variogram and punctual kriging II. Block kriging[J]. J. Soil Sci. , 1980, 31:315 - 341.
- [6] Okuda I, Okazaki M and Hashitani T. Spatial and temporal variations in the chemical weathering of basaltic pyroclastic materials[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1995, 59:887 - 894.
- [7] Cheng W C, David A L. Near - infrared reflectance spectroscopy - principal components regression analysis of soil properties[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 2001, 65:480 - 490.
- [8] 沈思渊. 土壤空间变异研究中统计学的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1989, 17(3):11 - 25.

Spatial Distribution of Nutrients of the Aquic Cinnamon Soils

ZHU An - ning¹, ZHANG Jia - bao¹, ZHANG Yu - ming², XIN Xiu - li¹

(1. Institute of Soil Science , Chinese Academy of Sciences, Jiangsu Nanjing 210008, China;

2. Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences, Hebei Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The characteristics of spatial variability was quantitatively analyzed for total N, total P, organic matter, available P, available K, hydrolyzed N, $\text{NH}_4 - \text{N}$ and $\text{NO}_3 - \text{N}$ of the aquic cinnamon soils in a 15ha of experimental field in Luancheng county in Hebei province by principle component analysis and geostatistical methods. The study provides an important basis for site - specific nutrient management and variable rate fertilization.

Key words: Soil nutrient; Spatial variability; Principle component analysis; Geostatistics analysis